生态学研究支撑喀斯特区域生态环境治理与科技扶贫

王克林* 陈洪松 曾馥平 岳跃民 张 伟 付智勇

中国科学院亚热带农业生态研究所 环江喀斯特生态系统观测研究站 长沙 410125

摘要 中科院环江喀斯特生态系统观测研究站面向我国西南喀斯特区域石漠化综合治理与生态服务提升和民生改善的重大需求，系统开展了喀斯特生态系统野外观测、试验与示范研究，发现了喀斯特坡地地表-地下二元水土流失特征，地表侵蚀产沙一般低于50 t/(km^2·a)，但人为干扰加剧地表侵蚀；揭示了人类活动对喀斯特退化生态系统的影响及其作用机理，阐明了喀斯特景观格局与关键生态过程的相互作用机理，研发了喀斯特退化生态系统适应性修复技术体系，开展了生态工程背景下喀斯特区域生态系统服务变化评估，提出了喀斯特景观保护的优化管控措施，构建了喀斯特生态脆弱区科技扶贫模式，形成了喀斯特生态系统服务优化调控的理论与技术体系，为我国西南地区石漠化治理与区域脱贫提供了重要科技支撑。

关键词 喀斯特，石漠化，长期定位监测，生态恢复，科技扶贫

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2018.02.012

我国西南喀斯特地区既是全球碳酸盐岩集中分布区面积最大（54 万平方公里）、岩溶发育最强烈、人地矛盾最尖锐的地区，也是景观类型复杂、生物多样性丰富、生态系统极为脆弱的地区。地处长江、珠江上游生态安全屏障区，西南喀斯特地区也是我国最大面积的连片贫困区域（据 2014 年国家公布的 592 个贫困县中有 246 个分布在西南喀斯特地区），占全国贫困县总数的 42%）。受地质背景制约，喀斯特区域成土速率慢，地表土层浅薄且分布不连续；独特的地表-地下二元水文地质结构导致水文过程变化迅速，水土资源空间分布不匹配；植被具有喜钙、耐旱、石生的特性，高强度人类活动导致植被破坏后较难恢复，水土流失加剧，以石漠化为特征的土地退化严重[1,2]。

为有效治理喀斯特生态环境，国家先后在喀斯特地区实施了天然林保护、退耕还林、石漠化综合治理、坡耕地水土流失治理、异地扶贫开发、珠江防护林等一系列生态建设工程，特别是国务院 2008 年批复了《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲（2006—2015 年）》，

*通讯作者
资助项目：中国科学院科技服务网络计划（STS计划）项目（KFJ-STS-ZDTP-036），国家重点研发计划项目（2016YFC0502400）
修改稿收到日期：2018年1月25日

2012 年又批复了《滇黔桂石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划（2011—2020 年）》，进一步加快了石漠化治理步伐。据国家林业局 2012 年发布的第二次石漠化监测公报显示，我国土地石漠化整体扩展的趋势已得到初步遏制，由过去持续增加转为“净减少”，但石漠化防治形势依然严峻。中共中央、国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》明确指出“继续推进石漠化综合治理”，国家“十三五”规划纲要也明确提出“提升西部生态安全屏障功能、推进石漠化区域综合治理”。中科院环江喀斯特生态系统观测研究站（以下简称“环江站”）作为国家野外科学观测研究站，近 20 年的长期野外观测研究为喀斯特地区石漠化综合治理与区域脱贫提供了重要科技支撑。

1 发现喀斯特坡地二元水土流失特征，地表产沙少，但人为干扰加剧侵蚀，通过改进或校正提升了喀斯特地区土壤侵蚀模型模拟精度

1.1 坡面降雨产流机制

大型径流小区定位监测表明，坡面地表产流少（径流系数 <5%），主要受控于土壤-岩石空间分布[3]。通过开挖大型断面（深 4 m），基于模拟降雨（40—120 mm/h），进一步证实坡面水文过程以地下水文过程（包括土壤-岩石界面壤中流、表层岩溶带蓄水、深层渗漏）为主（占降雨 70% 左右，图 1）。坡面地表径流仅在降雨强度高时出现且产流量少（2%—15%），起始产流时间与壤中流基本一致，地表产流表现为蓄满产流机制，而壤中流具有优先流的特点；表层岩溶带具有很强的水文调蓄功能，其变化幅度主要受控于表层岩溶带结构和前期含水量，而受降雨强度的影响较小[4,5]。结合探地雷达探测，发现“土壤-表层岩溶带”展现出由植物根系-土壤填充物-岩溶裂隙管道-碳酸盐岩基质共同耦合交织的复杂三维网络结构特征，并初步揭示了填充裂隙的生态水文功能取决于土壤（或填充物）的性质及其剖面分层特征；填充裂隙可为旱季植物提供部分水源，但并非都是水文-侵蚀过程快速通道[6,7]。

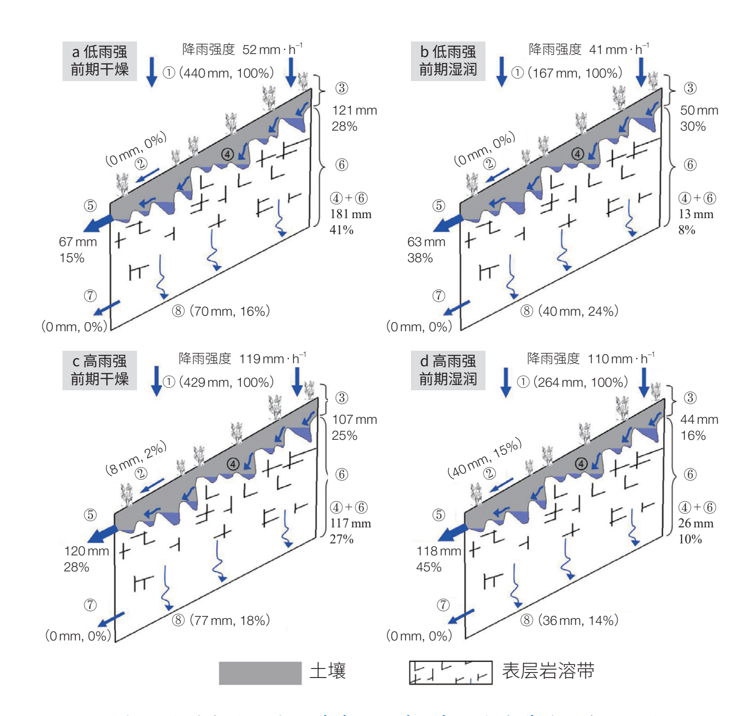


图 1 不同起始边界条件下喀斯特坡面土壤 - 表层岩溶带系统水量平衡

（a）低雨强且前期土壤 - 表层岩溶带干燥条件下；（b）低雨强且前期土壤 - 表层岩溶带湿润条件下；（c）高雨强且前期土壤 - 表层岩溶带干燥条件下；（d）高雨强且前期土壤 - 表层岩溶带湿润条件下。其中：①—降雨，②—地表径流，③—土壤蓄水和植被截留，④—岩石界面填注，⑤—壤中流，⑥—表层岩溶带蓄水，⑦—表层岩溶带侧渗，⑧—深层渗漏

1.2 小流域水文过程及其模拟

在地表地下水系比较封闭的喀斯特小流域，发现洼地土壤层发挥阻滞和平缓下伏岩石带补给地下水过程的主要作用；表层岩溶带具有较高的水分蓄持能力和对快速水文过程的延缓功能，在小流域水循环中扮演着过渡带和缓冲带的角色[8,9]。通过对小流域出口流量的监测与模拟，评估了改进的 Maillet、Mangin、Boussinesq 三种模型的适用性，并利用衰减系数估算了含水层不同介质的有效孔隙度及储水能力，发现将含水介质分为管道、裂隙、基质的改进的 Maillet 模型对小流域出口流量拟合精度最高，可用于小流域水文过程模拟。小流域水文过程迅速，含水层在衰减初期的 20 h 内排出约 60% 的水量；管道系统虽然发育程度不高，但连通性好，仍然是重要的排水介质（排水量占 25%）[10]。对于地表和地下水系相对开放且坡面垂向裂隙发育的石灰岩小流域，利用 LSSVM 支持向量机、BP-ANN 神经网络和状态空间模

型对表层岩溶泉泉水流量进行模拟，发现采用降雨量和相对湿度的状态空间方程模拟精度最高[11]。

1.3 水土流失/漏失过程及其模拟

基于坡面大型径流小区定位观测与峰丛洼地小流域同位素估算，发现喀斯特坡面地表土壤侵蚀产沙模数以微度（<50 t/(km^2·a)）为主，但人为干扰会增加地表侵蚀产沙量（100—300 t/(km^2·a)），并显著降低土壤养分含量[3,12-14]。通过分析铯同位素（^{137}Cs）及土壤有机碳在喀斯特裂隙中的剖面分布特征，证实了岩石裸露率高的耕地土壤颗粒随降雨沿地表负地形有呈向地下流失的趋势，但地下漏失主要发生在与地下河联通的落水洞或管道中[15]。研究结果为西南喀斯特地区土壤侵蚀强度分级标准和水土流失综合治理方案的制定提供了重要参考依据。并通过修正模型关键算法，提升了传统基于地表径流冲刷的土壤侵蚀模型（RMMF 和 RUSLE）在喀斯特峰丛洼地小流域水土流失过程模拟的适用性（与 ^{137}Cs 定量转换模型结果非常接近）[13,14]，进而推广到喀斯特县域水土保持功能评估并取得很好效果[16]。定量评估了西南喀斯特区大坝有效调控面积对其流域拦沙功效的影响，发现流域内大坝有效控制面积比例越大，减沙速率越强，呈现正对数关系[17]；同时发展了基于自相关理论的状态空间模型对不同喀斯特流域的月输沙量进行预测，解决了“地表-地下”双层空间开放水文系统喀斯特流域月尺度输沙量变异性大且不易预测的难题[18]。

2 揭示了人为干扰对喀斯特退化生态系统的影响及其作用机理，阐明了喀斯特生态系统演替过程中植被-土壤耦合变化规律

喀斯特生态系统受地质背景制约，高强度人为干扰是我国喀斯特生态系统退化的主要原因。目前，我国大部分喀斯特地区的植被为次生的矮林和灌草丛，甚至退化为石漠化山地[19,20]。研究发现，人为干扰是坡面和小流域尺度喀斯特土壤养分和水分格局存在特殊的“空间倒置”现象的主要原因，未受人类扰动影响的原生林生态系统的土壤养分和水分则表现出与非喀斯特地区相似的“洼积效应”（图 2）[21,22]。区域尺度上，进一步发现了景观格局随人为干扰强度变化也呈现出显著的梯度分异特征[23]。人为干扰导致的植被破坏影响了喀斯特土壤-植被系统的物质、能量平衡，诱发了土壤-植被系统的逆向演变，导致水土流失加剧，灌丛被人为开垦为耕地后，喀斯特石灰土表层有机碳更易流失，也加剧了地表侵蚀产沙量及土壤的垂直漏失[24-26]。同时，人为干扰造成了喀斯特植被群落结构和凋落物归还质量的变化，有机质净矿化速率升高，增加了土壤养分的流失风险[27]。对微生物而言，人为干扰造成了土壤微生物利用底物和微生境的改变，使生态系统土壤微生物熵和脲酶活性增强，土壤中变形菌急剧减少；同时造成了氨氧化菌和纤维素分解菌丰度增加，固氮菌丰度减少，不利于土壤碳氮固持[24]。

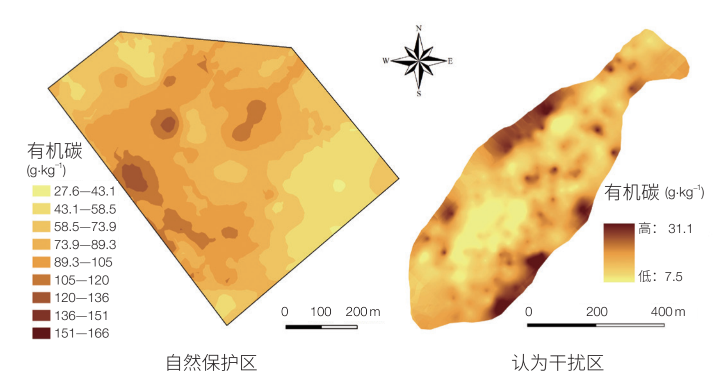


图 2 喀斯特特殊侵蚀过程导致土壤养分的“空间倒置”

基于退耕演替序列（包括耕地、草丛、灌丛、次生林和原生林，其中耕地和原生林作为对照样地）研究了喀斯特土壤总氮（N）的累积及影响因素，发现退耕后表层土壤总氮较快累积，0—15 cm 土层总氮累积速率约为12.4 g N·m^{-2}·yr^{-1}，经过 70 年左右可接近原生林水平[28]。基于植物群落叶片 N/P 比及土壤 NO_3^-/NH_4^+ 比均表明草丛阶段受氮限制，但恢复中后期（灌丛、次生林与原生林）氮循环过程逐渐开放，受磷（P）限制[28,29]。探讨了演替过程中生态系统养分限制的消减机制，发现先锋灌木和乔木通过草酸分泌激发微生物

和NAG酶活性，进而促进土壤氮循环及氮有效性、消减氮素障碍[30]。同时，发现喀斯特森林土壤的初级氮矿化、初级硝化、硝态氮异化还原为铵态氮（DNRA）和硝态氮固持速率均显著高于非喀斯特森林，且喀斯特森林土壤的初级硝化速率（GN）与铵态氮固持速率（GAI）的比值远高于1，但非喀斯特森林土壤GN/GAI比值与1无显著差异，进一步说明喀斯特森林土壤不受氮限制，但相邻的非喀斯特森林土壤则受氮限制[31]。在区域尺度上研究发现退耕后土壤总氮的快速累积，也相应促进了土壤有机碳的快速累积，退耕后0—15 cm土层有机碳的累积速率约为138 gC·m^{-2}·yr^{-1}[32]。退耕后喀斯特土壤有机碳与总氮快速累积也在区域尺度上得到了验证[33]。上述研究意味着西南喀斯特山区退耕后生态恢复中后期可能较少受氮限制，氮供应可保障生态恢复工程的固碳效应。

3 揭示了喀斯特退化生态系统生态服务提升的生物调控机制，研发了生态适应性修复技术体系

针对喀斯特地区水分蓄持环境的特殊性，改进了利用稳定同位素技术判定植物水分来源的研究方法，发现典型喀斯特生境优势植物种对不同类型水源的利用比例存在明显差异，稳定的深层岩溶水是维持旱季植物水分消耗的关键[34,35]。以植物水分来源的结果为基础，结合稳定性碳同位素技术，发现以近期雨水为主要水源的植物对应着“投机性”的水分利用策略，而依赖深层岩溶水的植物对应着相对保守的水分利用策略[36,37]。基于野外原位全根系挖掘的方法，发现不同生活型广布植物种大多以浅根系为主要特征，大根幅或高根系密度是这类植物充分利用有限土壤水的关键[38]。结合针对幼苗根系生长策略的盆栽试验，进一步证实喀斯特地区适生植物种并不总是以根系深扎或高水分利用效率为主要特征，植物水分适应机制呈现多样化特征，与不同植物对水分环境变化的响应特征密切相关[39]。

探讨了岩溶发育与生态恢复重建过程中养分循环演变的微生物作用机制，揭示了喀斯特土壤微生物的特殊性，如球囊霉属和慢生根瘤菌属分别是该区土壤丛枝真菌和固氮菌的优势类群，岩性显著影响土壤丛枝真菌和固氮菌群落组成与结构[40,41]；并发现随着植被的正向演替，尽管土壤微生物多样性没有显著变化，但群落组成和结构发生变化，微生物量增加，碳代谢的多样性增加，且原生林固氮根瘤菌数目明显增加，土壤氨氧化细菌多样性也发生显著变化[42,43]。同时，生态恢复明显提高了土壤食物网结构复杂性，表现为大体型土壤线虫的相对多度的增加和土壤线虫体型分布图谱相关曲线斜率的增加[44]，人工添加豆科植物可能通过影响微生物群落组成对土壤养分循环产生积极作用，豆科植物能够明显提高湿季土壤微生物总量、细菌生物量和真菌生物量，豆科植物添加对喀斯特生态系统生态服务的维持和提升具有明显的促进作用[45]。

研发了喀斯特退化生态系统适应性修复技术与模式，主要包括表层岩溶水生态调蓄与高效调配利用技术、洼地防治技术、雨水开发利用技术、土壤流失/漏失阻控技术、牧草耐涝栽培与生产力维持技术、耐旱植被群落优化配置技术等适应性修复技术体系[46]。将景观格局变化与喀斯特关键水土过程相结合，开展了喀斯特峰丛洼地适应性景观生态设计，提出了喀斯特地区替代型草食畜牧业发展模式和特色生态衍生产业培育方向，被国家发改委作为喀斯特山区产业发展的典型案例和石漠化治理的典型样板，并开展了试验示范与推广应用，取得了显著的社会生态与经济效益（图3），并产生了重要的社会影响。中央电视台“走近科学”栏目（《石头山上的新绿》）、《光明日报》（头版，《广西环江：从石漠化到世外桃源》）、《中国科学报》（《喀斯特发展的教科书》）以及中国新闻社与《人民日报》《经济日报》《文汇报》《科技日报》等相继报道了环江站在喀斯特生态环境治理方面的研究成果。




图3 环江站古周石漠化治理示范区
（a）生态恢复与重建前；（b）生态恢复与重建前后

4 积极响应国家“精准扶贫”战略，创新科技扶贫模式，为喀斯特区域脱贫提供重要科技与决策支撑

环江站围绕党中央提出的“精准扶贫”战略，结合《滇桂黔石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划（2011—2020年）》和扶贫生态移民工程的国家重大需求，针对西南集中连片特困地区生态环境脆弱、人地矛盾突出、产业缺乏及经济落后等问题，在广西环江毛南族自治县探索了“绿色生态扶贫”和“特色产业扶贫”新理念，引进新技术22项、新品种47个，示范区面积由4 000亩扩大至58 000亩，培训农民8 400人次，每个移民掌握2—3项技术，并对环境移民产生的原因及其对社会、经济、环境的影响进了研究，提出了适度的移民环境容量与合理的安置模式，为广西壮族自治区开展大规模的异地扶贫和规划安置40万人提供了决策依据和示范样板，也为环江开展异地扶贫工作提供了技术支撑。特别是自2013年以来，为打通精准扶贫的“最后一公里”，在全县积极探索“有土安置”“无土安置”及双轨并行的“双土安置”模式，采取“公司+基地+合作社+农户”模式，大力发展市场前景看好的豆腐、核桃、红心香柚等产业，为广西“整乡推进”脱贫提供了良好的示范样板。同时，研发了退化植被近自然改造、生态高值功能植物种类筛选与定向培育、人工植被复合经营与高效利用、立体高效生态衍生产业培育等技术，建立了标准化精准试验示范基地，开发了具有绿色、环保、健康等特点且市场前景广阔的特色植被复合经营产品，培育了经济林果、中药材种植加工和畜禽养殖等产业，构建了喀斯特山区环境移民-异地扶贫、植被复合经营和特色生态衍生产业培育等科技扶贫体系，为西南生态脆弱区的精准扶贫提供了技术支撑和模式样板[47]。

5 开展了生态工程背景下喀斯特生态系统服务变化评估，服务于国家后续石漠化综合治理工程及西南生态安全屏障建设

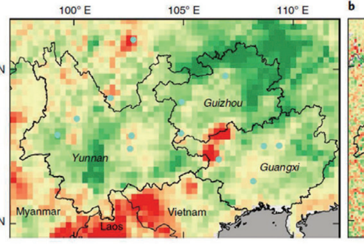
作为长江、珠江上游生态安全屏障区，西南喀斯特地区对维护国家生态安全具有重要的生态功能意义。依托长期样地定位观测与区域遥感监测，定量评估了喀斯特地区生态服务功能价值，揭示了生态治理措施提高了喀斯特生态系统服务，提升了喀斯特水土保持服务及碳固定功能，显著改善了农民生计的多样性[41,48-50]，并阐明了不同喀斯特地貌类型区生态工程成效的区域差异[51]。随着生态工程的实施，喀斯特石漠化地区植被景观格局恢复演变特征明显，植被斑块数减少、斑块连通性和聚集度增加，生态工程的实施促进了喀斯特地区植被的正向演替和土壤碳氮养分固定[41,52]，并进一步甄别了气候变化和人类活动对喀斯特地区植被恢复的相对影响，发现近30年来气候变化对喀斯特地区植被恢复的影响有限，

植被恢复主要分布在生态工程实施面积较大的区域[51]。发展了大区域尺度生态工程成效识别与厘定的综合集成方法，首次证实了大规模生态保护与建设工程的投入显著改善了区域尺度生态系统属性；不利气候条件下，生态工程的实施降低了土地退化的风险，提高了区域尺度植被覆盖和碳固定，减缓了喀斯特生态系统对气候变化响应的敏感性（图4）[53]；该研究成果也被 *Nature* 刊发专门文章详细评述[54]。

ARTICLES
https://doi.org/10.1038/s41893-017-0004-x
nature sustainability

Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering

Xiaowei Tong[1], Martin Brandt[2], Yuemin Yue[1,3*], Stephanie Horion[2], Kelin Wang[1,3*], Wanda De Keersmaecker[4], Feng Tian[2], Guy Schurgers[2], Xiangming Xiao[5,6], Yiqi Luo[5,7,8], Chi Chen[9], Ranga Myneni[9], Zheng Shi[5], Hongsong Chen[1,3] and Rasmus Fensholt[2]



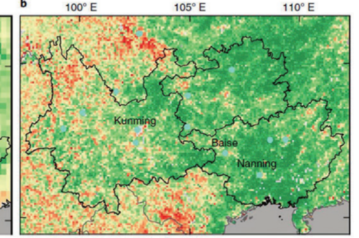


图4　西南喀斯特区域生态评估的相关结果发表在 *Nature Sustainability*

利用不同恢复阶段喀斯特植被生态系统的动态变化特征，阐明了环境与植被的协同演变规律，揭示了喀斯特森林格局的形成与维持机制，探讨了植被对喀斯特高度异质性生境的适应机制，发展了适应于不同环境特点和石漠化阶段的喀斯特植被群落优化配置模式[20]。提出喀斯特地区生态保护与建设工程的实施不能单方面追求植被覆盖（“绿度”）的增加，而是要权衡不同生态系统服务之间的关系，提升单位面积生态系统服务[46]。上述研究极大提升了环江喀斯特的科学与保护价值，有力支撑了环江喀斯特成功入选世界自然遗产地（图5）及环江县列入国家重点生态功能区和获批国家石漠公园建设，相关研究结果也被国家林业局第三次石漠化监测报告所采用，为国家重大生态工程效益评价提供了科学依据。

6 结语

近20年来，环江站面向我国西南喀斯特地区生态环境治理与科技扶贫的重大需求，围绕喀斯特生态系统格局-过程-服务变化研究，系统开展了喀斯特生态系统长期野外观测、试验与示范研究，阐明了喀斯特生态系统退化机制，揭示了人为干扰对喀斯特退化生态系统的影响及其作用机理，研发了喀斯特生态系统适应性修复技术与模式，构建了喀斯特生态脆弱区科技扶贫模式，提出了喀斯特生态系统服务优化调控的理论与技术体系，引领了我国喀斯特生态学研究，已成为我国喀斯特石漠化治理、水土流失防治与区域科技扶贫研究的主要平台与技术依托单位。当前，我国喀斯特地区石漠化治理已从前期有效遏制转到深入推进的治理转型阶段，扶贫开发也到了攻克最后堡垒的阶段。新形势下，亟须构建转型



图5　广西环江喀斯特世界自然遗产地

期喀斯特地区人与自然和谐的新依从关系，环江站将继续为我国西南喀斯特地区生态环境保护与建设以及区域扶贫提供基础理论与技术支撑。在中科院、科技部、国家自然科学基金委以及广西壮族自治区政府支持下，因为有以环江站为代表的长期野外观测研究与示范的努力和参与，“山清水秀生态美”将成为西南喀斯特区域的美丽名片。

参考文献

1 Gutierrez F, Parise M, Waele J D, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 61-88.

2 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 等. 现代岩溶学. 北京: 科学出版社, 2016.

3 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. 农业工程学报, 2012, 28(16): 121-126.

4 Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study. Geomorphology, 2015, 250: 1-14.

5 Fu Z Y, Chen H S, Xu Q X, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: implications of field rainfall simulation experiments. Hydrological processes, 2016, 30(5): 795-811.

6 王升, 陈洪松, 聂云鹏, 等. GEP算法结合探地雷达估测典型喀斯特坡地土层厚度. 土壤学报, 2015, 52(5): 1024-1030.

7 Yang J, Nie Y P, Chen H S, et al. Hydraulic properties of karst fractures filled with soils and regolith materials: Implication for their ecohydrological functions. Geoderma, 2016, 276: 93 -101.

8 Hu K, Chen H S, Nie Y P, et al. Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of southwest China. Scientific Reports, 2015, 5: 10215.

9 Chen H S, Hu K, Nie Y P, et al. Analysis of soil water movement inside a footslope and a depression in a karst catchment, Southwest China. Scientific Reports, 2017, 7: 2544.

10 Fu T G, Chen H S, Wang K L. Structure and water storage capacity of a small karst aquifer based on stream discharge in southwest China. Journal of Hydrology, 2016, 534: 50-62.

11 Li Z W, Xu X L, Xu C H, et al. Monthly sediment discharge changes and estimates in a typical karst catchment of southwest China. Journal of Hydrology, 2017, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.013.

12 Zhang W, Zhao J, Pan F J, et al. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China. Plant and Soil, 2015, 391: 77-91.

13 Feng T, Chen H S, Wang K L, et al. Modelling soil erosion using a spatially distributed model in a karst catchment of northwest Guangxi, China. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39: 2121-2130.

14 Feng T, Chen H S, Polyakov V O, et al. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: comparison of RUSLE model with radiocesium record. Geomorphology, 2016, 253: 217-224.

15 冯腾, 陈洪松, 张伟, 等. 桂西北喀斯特坡地土壤的137Cs剖面分布特征及其指示意义. 应用生态学报, 2011, 22: 593-599.

16 李成志, 连晋姣, 陈洪松, 等.喀斯特地区县域土壤侵蚀估算及其对土地利用变化的响应.中国水土保持科学, 2017, 15(5): 39-47.

17 Li Z W, Xu X L, Yu B F, et al. Quantifying the impacts of climate and human activities on water and sediment discharge in a karst region of southwest China. Journal of Hydrology, 2016, 542: 836-849.

18 Li Z W, Xu X L, Liu M X, et al. State-space prediction of spring discharge in a karst catchment in southwest China. Journal of Hydrology, 2017, 549: 264-276.

19 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.

20 宋同清. 西南喀斯特植物与环境. 北京: 科学出版社, 2015.

21 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异

特征及影响因子分析. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828-1835.

22 Zhang W, Wang K L, Chen H S, et al. Ancillary information improves kriging on soil organic carbon data for a typical karst peak-cluster depression landscape. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(5): 1094-1102.

23 张笑楠, 王克林, 张伟, 等. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性. 生态学报, 2009, 29(2): 749-757.

24 Chen H S, Zhang W, Wang K L, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(5): 1086-1093.

25 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 等.不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响. 土壤通报, 2013, 44(4): 925-930.

26 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.

27 Liu S J, Zhang W, Wang K L, et al. Factors controlling accumulation of soil organic carbon along vegetation succession in a typical karst region in Southwest China. Science of the Total Environment, 2015, 521: 52-58.

28 Wen L, Li D J, Yang L Q, et al. Rapid recuperation of soil nitrogen following agricultural abandonment in a karst area, southwest China. Biogeochemistry, 2016, 129: 341-354.

29 Zhang W, Zhao J, Pan F J, et al. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China. Plant and Soil, 2015, 391: 77-91.

30 Pan F J, Liang Y M, Zhang W, et al. Enhanced nitrogen availability in karst ecosystems by oxalic acid release in the rhizosphere. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 687.

31 Li D J, Yang Y, Chen H, et al. Soil gross nitrogen transformation in typical karst and nonkarst forests, southwest China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122, 2831-2840.

32 Yang L Q, Luo P, Wen L, et al. Soil organic carbon accumulation during post-agricultural succession in a karst area, southwest China. Scientific Reports, 2016, 6: 37118.

33 Li D J, Wen L, Yang L Q, et al. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen following agricultural abandonment in a karst region. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122: 230-242.

34 Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China. Plant and Soil, 2011, 341(1-2): 399-412.

35 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(2): 317-326.

36 Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China. Journal of Hydrology, 2012, 420-421: 264-274.

37 Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Seasonal variations in leaf δ13C values: implications for different water use strategies among species growing on continuous dolomite outcrops in subtropical China. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(10): 2571-2579.

38 Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different karst habitats of southwest China. Plant Ecology, 2014, 215(10):1099-1109.

39 Nie Y P, Chen H S, Ding Y L, et al. Comparison of rooting strategies to explore rock fractures for shallow soil-adapted tree species with contrasting aboveground growth rates: a greenhouse microcosm experiment. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1651.

40 Liang Y M, He X Y , Chen C Y, et al. Influence of plant communities and soil properties during natural vegetation restoration on arbuscular mycorrhizal fungal communities in a karst region. Ecological Engineering, 2015, 82: 57-65.

41 Liu L, He X Y, Wang K L, et al. The Bradyrhizobium-legume symbiosis is dominant in the shrubby ecosystem of the Karst region, Southwest China. European Journal of Soil Biology, 2015, 68: 1-8.

42 He X Y, Wang K L, Zhang W, et al. Positive correlation between soil bacterial metabolic and plant species diversity and bacterial and fungal diversity in a vegetation succession on Karst. Plant and Soil, 2008, 307(1-2): 123-134.

43 Chen X B, Su Y R, He X Y, et al. Comparative analysis of basidiomycetous laccase genes in forest soils reveals differences at the cDNA and DNA levels. Plant and Soil, 2013, 366(1-2): 321-331.

44 Zhao J, Xun R, He X Y, et al. Size spectra of soil nematode assemblages under different land use types. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 85: 130-136.

45 Zhao J, Zeng Z X, He X Y, et al. Effects of monoculture and mixed culture of grass and legume forage species on soil microbial community structure under different levels of nitrogen fertilization. European Journal of Soil Biology, 2015, 68: 61-68.

46 王克林, 岳跃民, 马祖陆, 等. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7098-7102.

47 曾馥平, 张浩, 段瑞. 重大需求促创新协同发展解贫困——广西壮族自治区环江县扶贫工作的实践与思考. 中国科学院院刊, 2016, 31(3): 351-356.

48 于一尊, 王克林, 陈洪松, 等. 基于参与性调查的农户对环境移民政策及重建预案的认知与相应——西南喀斯特移民迁出区研究. 生态学报, 2009, 29(3): 1170-1182.

49 张明阳, 王克林, 陈洪松, 等. 喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析. 生态学报, 2009, 29(11): 5891-5901.

50 Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of vegetation carbon sequestration in the karst area of northwest Guangxi, China. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(6): 5307-5317.

51 Tong X W, Wang K L, Yue Y M, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 54:105–113.

52 Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping. Ecological Engineering, 2013, 54: 245-253.

53 Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. Nature Sustainability, 2018, 1: 44-50.

54 Macias-Fauria M. Satellite images show China going green. Nature, 2018, 553: 411-413.

Ecological Research Supports Eco-environmental Management and Poverty Alleviation in Karst Region of Southwest China

WANG Kelin* CHEN Hongsong ZENG Fuping YUE Yuemin ZHANG Wei FU Zhiyong

(Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems (HORSKE) of Chinese Academy of Sciences was founded in 2001. Since then HORSKE has been committing itself to serve the national needs for rocky desertification restoration, ecosystem services promotion, and human wellbeing improvement. HORSKE has carried on comprehensive and long-term monitoring, experiment, and demonstration to the degraded karst ecosystem. HORSKE found the dual loss characteristics for both soil and water, revealed that surface soil

*Corresponding author

erosion modulus on karst hillslopes is less than 50 t/(km^2·a) and human disturbances could intensify the surface soil erosion speed. Furthermore, HORSKE clarified the effects of human activities on the degraded karst ecosystem and its mechanisms and expounded the interaction mechanisms of landscape pattern and key ecological processes in karst areas. HORSKE also developed adaptive restoration technology for degraded karst ecosystem. At the regional scale, HORSKE evaluated the ecosystem services changes under the implementation of ecological conservation projects. In addition, HORSKE proposed effective measures for karst landscape protection. For regional poverty alleviation, HORSKE developed and proposed scientific and technological modes for poverty alleviation in the karst eco-fragile areas. During the past 20 years, HORSKE has established theories and technologies for karst ecosystem services optimization and management. Long-term ecological research and demonstration in HORSKE has made important progresses on karst eco-environmental management and poverty alleviation. HORSKE supports scientific foundations for combating rocky desertification and regional poverty alleviation in the karst region of Southwest China.

Keywords karst, rocky desertification, long-term monitoring, ecological recovery and restoration, poverty alleviation through science and technology



王克林 中国科学院亚热带农业生态研究所党委书记、研究员、博士生导师，所学术委员会主任，环江喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站站长，国务院政府特殊津贴享受者，国家重点研发计划项目首席科学家。2001年9月—2013年2月任所长，2013年9月任所党委书记，中国生态学学会副理事长、*Journal of Resources and Ecology*及《生态学报》《山地学报》《地理科学》《生态学杂志》《中国岩溶》等刊物编委，全球重要农业文化遗产（GIAHS）中国专家委员会委员。主要从事景观格局变化与生态过程、生态系统服务研究，主持完成的洞庭湖流域生态功能优化成果获湖南省科技进步奖一等奖、西南喀斯特生态系统退化机制与适应性修复成果获得中国科学院科技促进发展奖一等奖。E-mail: kelin@isa.ac.cn

WANG Kelin Professor of Institute of Subtropical Agriculture (ISA), Chinese Academy of Sciences (CAS), the director of academic committee of ISA and Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, CAS. He was added to the list of the State Council Special Allowance and is chief scientist of the National Key Research and Development Program of China. He was the director of ISA from September 2001 to February 2013. Since September 2013, he is the Party Secretary of ISA. He currently serves as a vice director of the Ecological Society of China and an editorial member of *Journal of Resources and Ecology*, *Acta Ecologica Sinica*, *Mountain Research*, *Scientia Geographica Sinica*, *Chinese Journal of Ecology*, and *Carsologica Sinica*, respectively. He also serves as a member of Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS). He has long been engaged in the research of changes of landscape patterns, ecological processes, and ecosystem services. As the first accomplisher, he was awarded a First-Class Prize of Hunan Science and Technology Progress Award for the ecological function optimization of Donting Lake watershed. He was also awarded a First-Class Prize of Science and Technology for Development Award of CAS as the first accomplisher for the degradation mechanisms and adaptive restoration of karst ecosystem in Southwest China. E-mail: kelin@isa.ac.cn